

Konzept zur animationsgestützten kartographischen Abbildung dynamischer Prozesse – temporaler Sachdatenwürfel für lokale Signaturen

Andrea Naß¹, Stephan van Gasselt²

¹DLR, Institut für Planetenforschung, Berlin · andrea.nass@dlr.de

²Department of Geoinformatics, University of Seoul

Zusammenfassung: In den Geowissenschaften werden kartographische Animationen verwendet, um Untersuchungen und Analysen von komplexen Zuständen darzustellen. Durch eine solche Kombination räumlicher und temporaler Daten kann eine sehr hohe Informationsdichte aus verschiedenen Quellen bereitgestellt und kommuniziert werden. Hierfür werden häufig GIS-Technologien verwendet. Trotz der breiten Anwendungsbereiche sind die zeitlichen bzw. dynamischen Informationen in diesem Rahmen i. d. R. nicht in voller Tiefe bearbeitet. Folglich muss für jeden individuellen Anwendungsfall das zugrundeliegende Geodatenmodelle abgeleitet werden. Dieses Papier stellt das Konzept einer abstrahierten Datenstruktur vor, in der räumliche Datenprimitive mit den zeitbezogenen Attributen und gemeinsam mit den graphischen Informationen zur Visualisierung verwaltet werden. Durch diesen Ansatz ist es möglich, Objekte und Prozesse einheitlich zu organisieren, abzufragen und zu visualisieren, um daraus wiederum kartographische Animationen generieren zu können.

Schlüsselwörter: GIS, lokale Signaturen, temporale Daten, Datenmodell, Kartenanimation

Abstract: In the Earth sciences cartographic animation are used for investigation, analysis and visual validation of complex settings and allow depicting a higher level of information by combining spatial and attribute information from different sources. To accomplish this, GIS technology is commonly employed. Despite the broad field of application in GIS, temporal (dynamic) information is usually not covered in full depth. Consequently, spatial data models need to be developed and adopted for each individual case by building an underlying structure which allows relating spatial geometries to cartographic as well as thematic attributes, including time. This paper contributes on the conceptual level and provides an abstract data model which allows connecting spatial data primitives and temporal attributes with the graphical information using for visualization in order to manage, query and visualize animation of map objects on a higher and thus adjustable level.

Keywords: GIS, point symbols, time, data models, map animation

1 Einleitung

Animationen begegnen uns alltäglich in Bereichen der Unterhaltungsmedien, Werbung sowie in den Bereichen von Bildung und Wissenschaft. Gefördert durch ständig neue Entwicklungen in Hard- und Software der letzten Jahrzehnte wurde die Verwendung von Animationen ständig verstärkt (z. B. BRYNJOLFSSON & MCAFEE 2012). Entwicklungen dieser Art haben seit den 1970er-Jahren auch das Feld für die dynamische Visualisierung bzw. Animierung von raumbezogenen Informationen geebnet (z. B. FRIEDHOFF & BENZON 1989). In den Geowissenschaften dienen Animationen üblicherweise der Untersuchung und Visualisierung temporaler Daten sowie der Validierung und Demonstration von Modellen (z. B. DRANSCH 1997, 2014). Die Darstellung von Objektzusammenhängen und -Änderungen und die Einbindung temporaler Aspekte in Geoinformationssysteme (GIS) sind bis heute mit Adaptionen

des zugrundeliegenden Datenmodells verbunden. Da die ganzheitliche Darstellung des zeit-bezogenen Charakters in gängigen GIS noch nicht vollständig umgesetzt worden ist (z. B. ANDRIENKO et al. 2010), betrifft eine solche Adaption sowohl die Speicherung, die Verwaltung und auch die (karto-)graphische Visualisierung der Daten. Neben der Ergänzung temporaler Basistypen, müssen Objektstruktur und die Verarbeitung graphischer Informationen überarbeitet werden. Diese Schritte erhöhen den Komplexitätsgrad des GI-Systems und des gesamten Analyseprozesses.

Die Animation thematischer Information benötigt nicht nur ein übergreifendes Konzept und die Einbindung von Darstellungstechniken, sondern auch eine effiziente Möglichkeit die dynamischen Daten in dem zugrundeliegenden Datenmodell zu speichern (z. B. DiBIASE et al. 1992, HARROWER & FABRIKANT 2008). Eine solche Verwaltung stellt das übergeordnete Ziel der hier vorgestellten Entwicklungen dar. Im Detail bedeutet dies die Entwicklung eines strukturierten Konzepts, um raumbezogene Datenprimitive (siehe OGC 2011) als temporale Objekte speichern und verwalten, abfragen und auf Basis eines GIS-basierten Datenmodells visualisieren und animieren zu können. Der Schwerpunkt liegt gegenwärtig darauf, 1. eine Verbindung zwischen den inhaltlich relevanten Themengebieten Variable – Animation – Zeit herzustellen, 2. ein Konzept für mehrdimensionale und animierte lokale Signaturen zu erarbeiten, und 3. einen Formalismus zu beschreiben, der dieses Konzept abbildet und als Grundlage für die Implementierung dient.

Die hier vorgestellten Entwicklungen beziehen sich konkret auf die Visualisierung naturraumprägenden Objekte und Prozesse. Deren dynamischer Charakter fordert somit eine Animation mit direktem Zeitbezug. Animation ohne Möglichkeit der Ableitung eines zeitlichen Bezugs sind nicht Gegenstand der Ausführungen (*non-temporale Animationen*, z. B. DRANSCH 1997, 2014). Darüber hinaus, bezieht sich die Entwicklung auf lokale Signaturen, die maßstabsabhängig lineare oder flächenhafte Objekte repräsentieren und damit mit niedrigster Dimension hinsichtlich Geometrie und Topologie das höchste Level an Informationsdichte und Abstraktion aufweisen. Basierend hierauf können höhere Dimensionen wie Linien und Flächen folglich durch ähnliche Ansätze abgebildet werden können.

2 Kartographische Animation – Stand des Wissens

Die Art, wie Objekte und deren Zustandsänderungen angezeigt werden können, hängt von der Komplexität und Anzahl der Attribute sowie von dem jeweiligen Skalierungsniveau ab. BERTIN (1983) definiert die grundlegenden graphischen Variablen Form, Farbe, Richtung, Muster, Größe und Helligkeit. Daneben entwickelte er Regeln, wodurch die Verwendung dieser graphischen Variablen unterstützt werden sollen. Im Laufe der Zeit stellte sich heraus, dass sein Satz graphischer Variablen nicht ausreicht, um alle Aspekte abzudecken (MACEACHREN 1995). Zusätzlich zu den graphischen Variablen die in statischen Karten verwendet werden, setzten sich animierte Karten aus den drei grundlegenden Designelementen bzw. dynamischen Variablen *Szenendauer*, *Änderungsrate zwischen Szenen* und der *Szenenreihenfolge* zusammen (DiBASE et al. 1992). Dynamische Variablen können verwendet werden, um die Position eines Phänomens zu unterstreichen, seine Attribute zu betonen oder Änderung seiner räumlichen, zeitlichen und Attributdimensionen zu visualisieren (DiBASE et al. 1992). Aus diesem Grunde werden von MACEACHREN (2005) sechs dynamische Variable vorgeschlagen: (1) *zeitliche Position*, d. h. wann etwas angezeigt wird, (2) die *Dauer*, d. h.

wie lange etwas angezeigt wird, (3) die *Reihenfolge*, d. h. die zeitliche Chronologie der Ereignisse, (4) die *Änderungsrate*, d. h. die Größenänderung pro Zeiteinheit, (5) die *Frequenz*, d. h. die Geschwindigkeit der Animation, und (6) das *Synchronisieren*, d. h. die zeitliche Abstimmung zweier Ereignisse (NÖLLENBURG 2007).

Der erste Entwurf den Zeitbezug der Geographie in einem Konzept abzubilden ist auf das Jahr 1970 zurückzuführen, als HÄGERSTRAND den Raum-Zeit-Würfel vorschlug (HEDLEY et al. 1999). Innerhalb dieses Konzeptes werden Raum und Zeit als untrennbare Elemente gesehen. Der Würfel bildet die geographische Position entlang der x- und y-Achse, und die Zeit auf der z-Achse ab. Um diesen Raum-Zeit-Würfel anwenden zu können, wäre eine interaktive und dynamische Visualisierungsumgebung hilfreich, in der die Daten gesichtet, manipuliert und abgefragt werden können (KRAAK 2003). Für detaillierte Informationen über die Abbildung von Raum und Zeit wird der Leser z. B. auf PEUQUET (2002) oder auf PEUQUET & DUAN (1995) und die dort vorgestellte *event list* verwiesen. Heute dienen diese Konzepte als Grundlage für die Integration der Zeitaspekte in bestehende GIS-Umgebungen. Die Art und Weise, wie zeitliche Animationen – und somit die Zeit – angeordnet und innerhalb von Datenbankmanagementsystemen verwaltet werden, wird bereits seit den 1990er Jahren diskutiert (z. B. MA & WANG 1999, PEUQUET 1999, WACHOWICZ 1999, OTT & SWIACZNY 2001).

Wird nun die Entwicklung kartographischer Animationen beleuchtet, so unterstreichen OGAO & KRAAK (2002), dass animierte Karten sehr gut für die visuelle und explorative Analysen von komplexen Systemen verwendet werden können, da in ihnen die Objektlage, -attribute und -zeit(en) gemeinsam betrachtet werden können. Sie erlauben dem Betrachter sich mit realen Prozessen als Ganzes und nicht in einzelne Instanzen unterteiltes Gefüge zu befassen (OGAO & KRAAK 2002). Um räumliche Daten innerhalb einer Karte als zeitabhängige Sequenz abzubilden, können die einzelnen Bilder in einem Datenformat zusammengefügt werden (z. B. als animierte Graphics Interchange Format, GIF). Diese Umsetzung wurde durch PEUQUET & DUAN (1995) und ihrem Ansatz zu *snapshot* aufgezeigt, wobei alle raumrelevanten Parameter direkt an jedes einzelne Bild geknüpft und zeitliche Verläufe anhand einer externen Zeitliste organisiert werden. Alternativ hierzu können andere Systeme Objektänderungen zwischen zwei Instanzen interpolieren (z. B. RASE 2000; MARSCHALLINGER 2006). Für weitere Hintergrundinformationen über Geo-Visualisierung ist hier z. B. auf DYKES et al. (2005) und NÖLLENBURG (2007) verwiesen. Einen allgemeinen Überblick über animierte Karten ist von HARROWER (2004) gegeben.

Aktuelle Entwicklungen in GIS-Umgebungen befassen sich mit der Integration temporaler Aspekte und der Animation von Karten. Diese Themen werden entweder durch Zeitfeldern die auf Zeitreglern angeordnet sind (z. B. GRASER 2011, ESRI 2015) oder über mehrdimensionale Bildformate (z. B. Unidata netCDF Format), die Zeitscheiben innerhalb eines Raum-Zeit-Würfels darstellen, bearbeitet. Ein Praxisbeispiel, das kartographischen Animationen als Visualisierung geologischer Prozesse verwendet, wird z. B. von MARSCHALLINGER (2006) vorgestellt.

3 Konzept des temporalen Sachdatenwürfels

Eine alternative Entwicklung zu den oben beschriebenen Konzepten, beschreibt der hier vorgestellte temporale Sachdatenwürfel. Hierbei wird der inhärente Zeitbezug jedes Objekts als

zusätzliches Attribut gespeichert und an die entsprechenden graphischen Attribute und Animationsparameter verknüpft. Um dies zu lösen, wird im Folgenden das theoretische Konzept für eine kartographische Animation von mehrdimensionalen lokalen Signaturen beschrieben und im Detail die folgenden Aspekte bearbeitet:

1. Zusammenfassung der zeitbezogenen Änderungen, durch die der Objektraum mit all seinen Entitäten und Entstehungs- bzw. Änderungsprozessen geprägt wird. Für diese zeitlichen Änderungen werden die graphischen Variablen und deren Skalierungsniveaus gelistet, die zu deren Visualisierung verwendet werden können.
2. Ableitung des Konzepts für multidimensionale lokale Signaturen. Dieses Konzept ist visuell angelehnt an die bereits durch HEDLEY et al. (1999) und KRAAK (2003) vorgestellt Darstellung des Raum-Zeit-Würfels.
3. Darstellung des Formalismus (Berechnung und Datenmodell), der als Basis des Konzepts und zur Implementierung in eine GI-Umgebung dient.

3.1 Zeitabhängige Änderungen von Objekten

Wie von KRAAK (2007) ausgeführt, können Animationen räumlicher Daten Veränderungen im Raum, der Attribute und in der Zeit abbilden. In der gleichen Weise wie die räumliche Lage und Ausdehnung mittels eines Kartenmaßstabs beschrieben wird, können zeitrelevanten Attribute in einem zeitlichen Maßstab eingeordnet werden, bei welchem die Ereignisse in Echtzeit oder in einer langsameren oder schnelleren Geschwindigkeit erfasst sind. Die Definition, wie reale Objekte und Prozesse im Rahmen der Animation abgebildet werden sollen, ist essenziell, um (a) verschiedene Szenarien zu differenzieren, die innerhalb unterschiedlicher Datenmodelle für kartographische Animationen verwendet werden, und (b) Regeln aufzustellen, wobei Berechnung festgelegt werden, um das Verhalten der Szenarien abbilden zu können. Alle Objekte und Prozesse besitzen mindestens zwei zeitliche Attribute, (1) Zeitpunkt der Entstehung (definiert durch t_i) und (2) Zeitdauer der Existenz (definiert durch $t_j - t_i$). Die Zeitdauer beschreibt die einzelnen Ereignisse und Prozesse, die innerhalb der gesamten Zeitspanne nacheinander aber auch parallel, abhängig und unabhängig voneinander ablaufen. t_i steht hierbei für einen konkreten Zeitpunkt der entweder ein Ereignis selbst oder den Anfangspunkt eines Prozesses definiert. t_j beschreibt den Endpunkt eines Prozesses. Neben diesen objekt- bzw. prozessbezogenen Zeitangaben gibt es noch eine weitere temporale Größe, die (3) Zeitspanne, also der gesamte Beobachtungszeitraum (definiert durch $t_n - t_m$). t_n steht für den Schlusspunkt und t_m für den Anfangspunkt des Beobachtungszeitraums. Diese Definitionen dienen als Grundlage für die Umsetzung der kartographischen Animationsparameter als Konzept.

Die Möglichkeiten, wie die temporalen Objekt- und Prozessänderungen dargestellt werden können, hängt von der Komplexität und Anzahl der Attribute, aber auch von dem jeweiligen Skalierungsniveau (z. B. BERTIN 1983) ab. Objektänderungen können einzeln, aber auch in Kombination auftreten (hier als 1- bis 3-dimensional) und stellen so z. B. Geschwindigkeiten, Wachstum, Rückgang, Verteilungen dar. Welche graphischen Variablen für eine kartographische Animation der naturräumlichen Objekte verwendet werden (können), um damit den dynamischen Charakter so effektiv wie möglich abzubilden, ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Skalierungsniveau der graph. Variablen zur Darstellung der naturraumprägenden Objekte und Prozesse

Objektänderungen	Skalierungsniveau	Graph. Variablen	Beispiel
Zusammensetzung	Nominalskala	Farbe (qualitativ) ODER Farbhelligkeit/-sättigung (quantitativ)	Gefahrenklassen (diskrete Klassen), Änderungen der stofflichen Zusammensetzung (kontinuierlich Klassen)
$Z(t) \rightarrow$ Veränderung der stoffl. Zusammensetzung	Ordinalskala		
Größe $G(t) \rightarrow$ Größenveränderung	Ratioskala Intervallskala	Größe (quantitativ)	Fläche(n) überfluteter Gebiete
Richtung, Rotation $\phi, R \rightarrow$ Richtungsangabe $\phi(t) \rightarrow$ Geschwindigkeit	Intervallskala Ratioskala	Richtung bzw. Rotation, (quantitativ)	Windrichtungen, Geschwindigkeit von Hangrutschungen

3.2 Der temporale Sachdatenwürfel

Wie in Tabelle 1 gezeigt, gibt es drei Arten wie naturraumprägende Objekte und Prozesse verändert werden können (Zusammensetzung, Größe und Rotation/Richtung). Bevor es möglich ist, diese 1- bis 3-dimensionalen Änderungen in einem strukturierten Modell, das für die Speicherung von und den Zugriff auf Geodaten notwendig ist, zu integrieren, ist die Einbindung der möglichen graphischen Variablen innerhalb des Modells vorzunehmen. Der Sachdatenwürfel repräsentiert ein visuelles Werkzeug und ist eingängig, wenn Animationen lokaler Signaturen über nicht mehr als drei graphischen Variablen abbildbar sein sollen.

Grundlage des Modells bildet für die kartographischen Sachdaten ein kartesisches Koordinatensystem dessen Achsen den Sachdatenwürfel auf Basis der möglichen Objektänderungen (siehe Tab. 1) aufspannen. Änderungen von Farbwerten, Größenänderungen sowie Richtungs-/Rotationsänderungen werden auf den jeweiligen x, y und z-Achsen des Sachdatenwürfels aufgetragen und bilden ein eigenes Inertialsystem (siehe Abb. 1A). Hierbei steht der Koordinatenursprung 0 für *keine* Objektänderung und der Wert 1 auf jeder Achse für *eine beliebige* Objektänderung. Abbildung 1 B zeigt, wie die 1- bis 3-dimensionalen Objektänderung, bislang noch unabhängig eines zeitlichen Maßstabs und Veränderungen auf verschiedenen Achsen, beschrieben werden können.

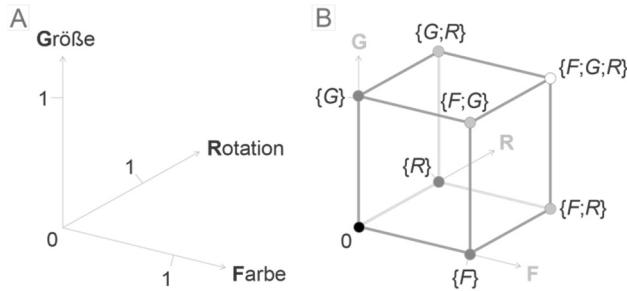


Abb. 1: Sachdatenwürfel für 1 bis 3-dimensionale Objektänderungen in einem dreiachsigen Koordinatensystem (F steht für *Farb*änderungen, G steht für *Größen*änderungen, R steht für *Richtungs-/Rotations*änderungen)

$\{0|0|0\}$ in Abbildung 2B repräsentiert den Ursprung und einen Zustand ohne Objektänderung. Die Punkte auf $\{0|1|0\}$, $\{1|0|0\}$ und $\{0|0|1\}$ stellen eine 1-dimensionale Änderung entweder in *Farbe*, *Größe* oder *Richtung/Rotation* dar. Die Punkte auf $\{1|1|0\}$, $\{1|0|1\}$ und $\{0|1|1\}$ stellen eine 2-dimensionale Änderung als Kombination aus *Farbe* und *Größe*, *Farbe* und *Rotation* und *Größe* und *Rotation* dar. Der Punkt auf $\{1|1|1\}$ steht für die 3-dimensionale Änderung mit Änderungen in *Farbe*, *Größe* und *Rotation*.

Durch die Nutzung dieses parametrischen Würfels können alle einzelne und kombinierte Objekt und Prozessänderungen, die in Tabelle 1 gelistet wurden, beschrieben werden. Da ein diskreter Zustand stets einem diskreten Zeitpunkt zugeordnet und über diesen charakterisiert werden muss, ist jede Zustandsänderung nicht nur als eine Veränderung auf einer, zwei oder drei Achsen abbildbar, sondern auch durch eine Ursprungsänderung auf dem Zeitstrahl. In Abbildung 2 sind Sachdatenwürfel und die Zeitleiste mit Ursprung des Würfels auf der Zeitlinie veranschaulicht. Auf diese Weise wird der erste Zeitpunkt t_1 (als Datentyp *Datum*) gespeichert, und wird durch 0-3 Attribute $\{t_1|F_1|G_1|R_1\}$, welche die Objektänderung beschreiben, ergänzt (siehe Abb. 2 A). Durch Verschieben des Würfels auf der Zeitlinie zum nächsten bekannten Zeitpunkt t_2 werden die Werte aktualisiert in $\{t_2|F_2|G_2|R_2\}$ gespeichert (siehe Abb. 2 B).

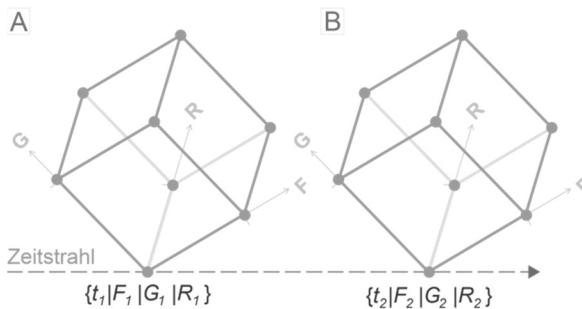


Abb. 2: Sachdatenwürfel, der durch die Anknüpfung an einer Zeitleiste die temporalen Aspekte der Objektänderungen beinhalten und verarbeiten kann

Um durch den Sachdatenwürfel nun auch Werte der negativen und relativen Objektänderungen, d. h. im Sinne von Größenabnahme, Reduzierung von Farbhelligkeiten, Rückgang der Rotationsgeschwindigkeit etc., abbilden zu können, werden alle Achsen des Würfels in die negative Richtung erweitert. Wie in Abbildung 3 dargestellt ist, umfasst der obere Bereich alle positiven $\{t_1 | F_1 | G_1 | R_1\}$ (siehe Abb. 3A) und der untere Bereich alle negativen Veränderungen bzw. $\{t_2 | -F_2 | -G_2 | -R_2\}$ (siehe Abb. 3B).

Auf die gleiche Weise kann jeder andere positive oder negative Wert auf einer der drei Achsen dargestellt werden, z. B. $\{t_1 | F_1 | G_1 | R_1\} \rightarrow \{t_2 | F_2 | G_2 | -R_2\}$ (Abb. 3C+D). Hierdurch kann eine lokale Signatur beschrieben werden, deren *Größe*- und *Richtungs*-/Rotationsänderung durch einen absoluten Wert abnimmt, die graphische Variable *Farbe* bleibt jedoch unverändert bzw. erfährt eine z. B. durch eine zunehmende Farbsättigung eine „positive“ Änderung.

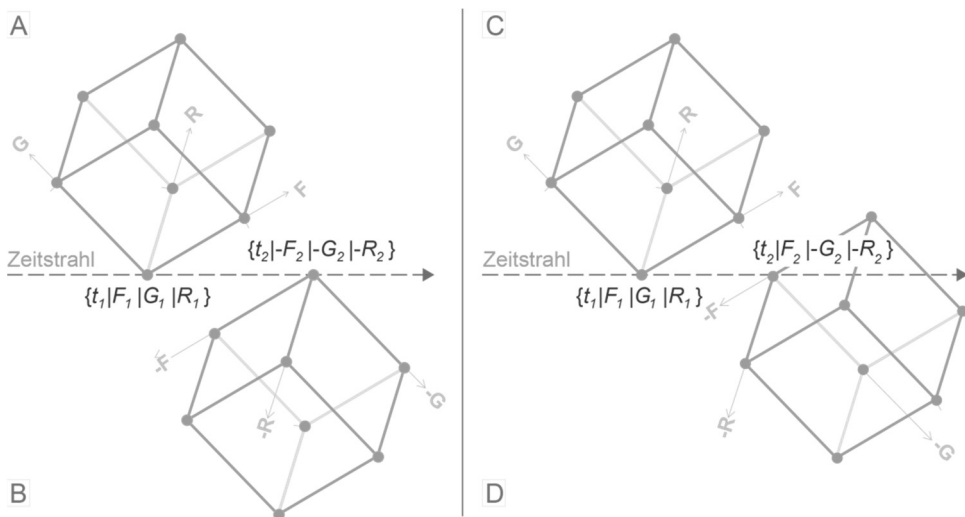


Abb. 3: Kombinierte Sachdatenwürfel für positive und absolute wie auch negative und relative Werte, die über eine Zeitleiste auch den temporalen Aspekt abdecken können (siehe A+B). Durch die freie Verschiebung des Würfels auf den drei Achsen, können die Objektänderungen beliebig kombiniert auftreten (siehe C+D).

3.3 Grundlegende formale Betrachtungen

Das hier beschriebene Konzept des temporalen Sachdatenwürfels benötigt formale Grundlagen sowohl zur Beschreibung allgemeiner quantifizierbarer Zusammenhänge, um eine Metrik für die jeweiligen Achsen zu etablieren, als auch zur weiteren Konzeption und Implementierung eines Datenbankmodells, welches die Speicherung und die Verwaltung der Attribute zulässt. Zur Einführung einer Attribut-Metrik, die es erlaubt Zustandsänderungen über Veränderungen von Attributwerten sowohl *relativ* als auch *absolut* zu erfassen, dienen mögliche Anwendungsfälle (*use cases*). Die sich daraus ergebenden Notwendigkeiten würden entsprechend in die Implementierung eines Datenmodells miteinfließen.

In einer grundlegenden Definition wird davon ausgegangen, dass die Zeit im Rahmen der Betrachtungsmaßstäbe stets entlang dieses universellen Zeitstrahls linear voranschreitet. Jede Instanz der Zeit t_i , d. h. jeder *event* kann durch ein *datetime*-Attribut gespeichert werden und wird durch drei in sich non-temporale Sachdaten Zustände komplettiert: Länge/Größe g , Rotation ϕ r und Farbe f . Der Zustand der Attribute zu einer Instanz i wird beschrieben als $\{t_i | f_i | g_i | r_i\}$. Zu einer weiteren Zeitinstanz t_{i+j} können sich kein, ein, zwei beliebige oder alle drei Attributwerte verändert haben $\{t_{i+j} | f_{i+j} | g_{i+j} | r_{i+j}\}$. Die Veränderung der Attributwerte zwischen zwei Zeitinstanzen werden beschrieben über die absolute Differenz der Werte zu t_i und t_{i+j} mit $\Delta t = t_{i+j} - t_i$:

1. Absolute Differenz

$$\{\Delta f | \Delta g | \Delta r\} = \{f_{i+j} - f_i | g_{i+j} - g_i | r_{i+j} - r_i\}$$

2. Relative Veränderung

$$\{\delta f | \delta g | \delta r\} = \{f_{i+j}/f_i | g_{i+j}/g_i | r_{i+j}/r_i\}$$

3. Veränderungsrate

$$\{f' | g' | r'\} = \{(f_{i+j} - f_i)/(t_{i+j} - t_i) | (g_{i+j} - g_i)/(t_{i+j} - t_i) | (r_{i+j} - r_i)/(t_{i+j} - t_i)\}$$

Hierbei kann jedes Sachdatenattribut und jeder Attributwert mittels gewöhnlicher relationaler Algebra über das Zeit-Attribut selektiert oder modifiziert werden. Beispielsweise kann eine lokale Signatur die Größe/Ausdehnung/Länge eines Objektes der realen Welt repräsentieren, welches zu Beginn einer zeitlichen Betrachtung t_0 die Größe g_i besitzt und zum Zeitpunkt t_{i+j} auf eine Größe g_{i+j} anwächst und dessen Größe sich auf g_{i+k} zu einem Zeitpunkt t_{i+k} verringert. Jeder Zustand wird über einen Tupel abgebildet. Die gesamte Größenänderung ist gegeben durch $\Delta g = g_i - g_{i+k}$ und kann einen positiven oder negativen Wert besitzen. In gleichem Maße kann es auch als Summe der Veränderungen $\Sigma \Delta t$ zu jeder Instanz dargestellt werden: $g_i - g_{i+j} - g_{i+k}$.

Da jeder temporale Sachdatenwürfel auf dem Zeitstrahl Veränderungen zu diskreten Zeitpunkten darstellt, kann jeder Wert eines Sachdatenattributs als Richtungsvektor vom lokalen Ursprung angesehen werden und jede Verschiebung entlang des Zeitstrahl über einen entsprechenden Ortsvektor mit dem Ursprung im Minimum des Betrachtungszeitraums. Geometrisch entspricht die Differenz zwischen den Richtungsvektoren zweier Betrachtungen trivialerweise der absoluten Veränderung und unter Berücksichtigung der Zeitdifferenz entspricht diese der Veränderungsrate und damit der Geschwindigkeit einer Änderung (über den Betrachtungszeitraum), d. h. einer positiven oder negativen Wachstumsrate oder einer Rotationsgeschwindigkeit bzw. Geschwindigkeit einer Richtungsänderung.

4 Diskussion

Durch die Verwendung des temporalen Sachdatenwürfels ist es möglich, alle 1- bis 3-dimensionalen Signaturkombinationen darzustellen, welche die Objekt- und Prozessänderungen abbilden und somit den Naturraum prägen. Dieses Konzept dient als Grundlage für eine GIS-basierte Datenstruktur, die den zeitlichen Charakter der Objekte direkt in das zugrundeliegende Datenmodell integriert und somit die einzelnen Objekte und Prozesse als dynamische Bestandteile innerhalb einer kartographischen Animation darstellen kann. Zeitbezogene Attribute können direkt in jedem relationalen Datenmodell organisiert, verwaltet und gespeichert werden.

Bevor ein solches Konzept und sein Formalismus in einem zugrundeliegenden Datenmodell implementiert werden kann, müssen zusätzlich Informationen gegeben sein:

- *Änderungseinheiten:* Während absolute *Größenänderungen* einfach zu implementieren sind, gibt es zwei Möglichkeiten um die relativen *Größenveränderungen* zu berücksichtigen: entweder durch diskrete Werte, wobei ein Wert x eine Addition oder Subtraktion von einem Wert x auf einen bestehenden Wert beschreibt. Oder relativ als Prozentangabe und dadurch als Änderungsfaktor wobei ein Wert x die Skalierung eines Wertes beschreibt. Auch die absoluten und relativen *Richtungs-/Rotationsänderungen* fordern eine vorangestellte Entscheidung ob es sich um Änderungen des *Drehwinkels* ($0 \dots 360^\circ$) in oder entgegen des Uhrzeigers handelt oder um eine *Richtungsweisung* um einen bestimmten Betrag.
- *Achseneinheiten:* Jede Achse hat eine bestimmte Einheit, die von Modell zu Modell variieren kann. Die jeweiligen Skalen müssen im Rahmen des Datenmodells festgehalten und der Verwaltung der Signaturen zugeordnet werden.
- *Farbwerteinheiten:* das verwendete Farbmodell muss definiert (Farbskala, hex-Werte, RGB, IHS, CMYK, ...) und die konkreten Änderungen innerhalb dieses Farbmodells festgelegt werden.

Wie jedoch auf diese Informationen zugegriffen und wie diese Informationen im Rahmen kartographischer Animationen weiterverwendet werden können, kann nicht auf einer abstrakten und konzeptionellen Ebene gelöst und muss in jedem GI-System individuell beantwortet werden.

5 Fazit

Um räumliche Informationen mit nicht-räumlichen Attributen und mit zeitlichen Eigenschaften kombinieren zu können, werden häufig GIS-Technologien verwendet. Für den Umgang mit den zeitlichen Komponenten müssen diese Systeme jedoch für jeden Anwendungsfall individuell spezifiziert werden. In herkömmlichen GIS werden alle räumlichen und thematischen Objektinformationen als Attributwerte einer Relation gespeichert. Für eine ganzheitliche Verwaltung und Nutzung aller Objektattribute müssen jedoch auch die grafischen Informationen, die für die kartographische Visualisierung bzw. Animation gefordert sind, im Rahmen des relationalen Datenmodells organisiert werden. Der Sachdatenwürfel repräsentiert ein visuelles Werkzeug, um die temporalen Sachdaten mit den graphischen Informationen zusammen zu bringen und ist zugänglich, wenn Animationen lokaler Signaturen über nicht mehr als drei graphischen Variablen abbildbar sein sollen.

Für die weitere Bearbeitung zur Umsetzung ist die Beantwortung folgender Fragen wichtig:

- Wie können Attributwerte für *Farbe*, *Größe* und *Richtung/Rotation* gespeichert werden, sodass die verschiedenen GIS-Implementierungen sie für die kartographischen Animationen nutzen können?
- Wie können graphische Informationen physikalisch direkt in ein zugrundeliegendes Datenmodell implementiert werden?
- Wie kann das hier vorgestellte Konzept und vorgeschlagene Datenmodell mit einem dynamischen und webbasierten Kartendienst verbunden werden?

- Gibt es eine Möglichkeit, die Erzeugung, Speicherung und Visualisierung von Animationen über Bewegungspfade oder automatischen Interpolationen zu lösen?

Dies sind nur einige der Themen, welche die Implementierung kartographischer Animationen betreffen. Die Integration der *Zeit* als zusätzliche Dimension in GIS erhöht deutlich die Komplexität jedes Datenmodells und kann u. U. den Zugang des Anwenders stark beschränken. Daraus begründet sich der nächste Schritt, die Gestaltung der Zeit im Rahmen von Datenmodellen zu vertiefen, um die verschiedenen Ansätze zu überprüfen und einen hier gültigen Formalismus abzuleiten. Dies führt in der Konsequenz dazu, den bestehenden Formalismus weiter auszubauen, Anwendungsfälle zu erarbeiten und letztlich ein Datenmodell zu konzipieren und zu implementieren, welches für andere Anwendungsfälle adaptiert werden kann.

Literatur

- ANDRIENKO, G. ANDRIENKO, N., DEMSAR, U., DRANSCH, D., DYKES, J., FABRIKANT, S., JERN, M., KRAAK, M.-J., SCHUMANN, H. & TOMINSKI, C. (2010), Space, time and visual analytics. *International Journal of Geographical Information Science*, 24 (10), 1577-1600.
- BERTIN, J. (1983), *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*. University of Wisconsin Press, 1983 (erste Publikation auf franz. (1967), ins engl. übersetzt (1983) durch BERG, W. J.).
- BRYNJOLFSSON, E. & MCAFEE, A. (2012), *Race against the Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy*. Digital Frontier Press.
- DIBIASE, D., MACEACHREN, A. M., KRYGIER, J. B. & REEVES, C. (1992), Animation and the role of map design in scientific visualization. *Cartography and Geographic Information Systems*, 19 (4), 201-214.
- DRANSCH, D. (1997), *Computer-Animation in der Kartographie – Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- DRANSCH, D. (2014), *Computer-Animation in der Kartographie – Theorie und Praxis*. Überarbeitete Auflage der 1. Aufl. von 1997. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- DYKES, J., MACEACHREN, A. M. & KRAAK, M.-J. (2005), Introduction Exploring Geovisualization. In: DYKES, J., MACEACHREN, A. M. & KRAAK, M.-J. (Eds.), *Exploring Geovisualization – A volume in International Cartographic Association*. Elsevier Ltd., Amsterdam, 1-19.
- ESRI (2015), *ArcGIS for Desktop – Documentation*. <http://desktop.arcgis.com/de/documentation/> (10/2015).
- FRIEDHOFF, R. M. & BENZON W. (1989), *Visualization: The second computer revolution*. New York.
- GRASER, A. (2011), Visualisierung raum-zeitlicher Daten in Geoinformationssysteme am Beispiel von Quantum GIS mit „Time Manager“-Plug-In. Konferenzbeitrag, FOSSGIS 2011, Heidelberg.
- HARROWER, M. (2004), A look at the history and future of animated maps. *Cartographica – The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 39 (3), 33-42.
- HARROWER, M. & FABRIKANT, S. (2008), The role of map animation in geographic visualization. In: DODGE, M. & TURNER, M. (Eds.), *Geographic visualization: Concepts, tools and applications*. Wiley-Blackwell, New York, 49-62.

- HEDLEY, N. R., DREW, C. H., ARTIN, E. A. & LEE, A. (1999), Hägerstrand Revisited: Interactive Space-Time Visualization of Complex Spatial Data. *Informatica – An International Journal of Computing and Informatics*, 23 (2), 155-168.
- KRAAK, M.-J. (2003), The space-time cube revisited from a geovisualization perspective. In: *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference*, Durban, South-Africa, 1988-1995.
- KRAAK, M.-J. (2007), Cartography and the use of animation. In: CARTWRIGHT, W., PETERSON, M. P. & GARTNER, G. (Eds.), *Multimedia Cartography*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 317-326.
- MA, J. & WANG, Y. (1999), A Spatiotemporal Data Model on Relational Databases for Coastal Dynamic Research. *Marine Geodesy*, 22, 105-114.
- MACEACHREN, A. M. (1995), *How Maps Work: Issues in Representation and Design*. Guilford Press.
- MACEACHREN, A. M. (2005), Moving Geovisualization toward Support for Group Work. In: DYKES, J., MACEACHREN, A. M. & KRAAK, M.-J. (Eds.), *Exploring Geovisualization – A Volume in International Cartographic Association*, Elsevier Ltd Amsterdam, 445-462.
- MARSCHALLINGER, R., GUSENBAUER, F. & SCHMUCK, C. (2006), Visualisierung geologischer Prozesse mittels kartographischer Animation. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik 2006*. Wichmann Verlag, Heidelberg, 407-414.
- NÖLLENBURG, M. (2007), Geographic Visualization. In: KERREN, A., EBERT, A. & MEYER, J. (Eds.), *Human-Centered Visualization Environments*, Vol. 4417 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 257-294.
- OGAO, P. J. & KRAAK, M.-J. (2002), Defining visualization operations for temporal cartographic animation design. *Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4 (1), 23-31.
- OGC – OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM (2011), *Implementation Standard for Geographic Information – Simple feature access – Part 1*, Version 1.2.1, Ref.-No. OGC 06-103r4.
- OTT, T. & SWIACZNY F. (2001), *Time-integrative Geographic Information Systems – Management and Analysis of Spatio-Temporal Data*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- PEUQUET, D. (1999), Time in GIS and geographical databases. In: LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J. & RHIND, D. W. (Eds.), *Geographical Information Systems 1, Principles and Technical Issues*. John Wiley & Sons, 91-103.
- PEUQUET, D. (2002), *Representations of space and time*. Guilford, New York.
- PEUQUET, D. J. & DUAN, N. (1995), An event-based spatio-temporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographic data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9 (1), 7-24.
- RASE W.-D. (2000), Kartographische Animationen zur Visualisierung von Raum und Zeit. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.), *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*. Wichmann Verlag, Heidelberg, 419-429.
- WACHOWICZ, M. (1999), *Object-oriented Design for temporal GIS*. Taylor & Francis.